◆ 综述与专论 ◆

噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在土壤中的环境归趋及对非靶标生物的毒性效应研究进展

潘莉璇[1,2],毛连纲[2*],张 兰[2],张燕宁[2],朱丽珍[2],蒋红云[2],张清明[1],刘新刚[2*]

(1. 青岛农业大学植物医学学院,山东青岛 266109;2. 中国农业科学院植物保护研究所,北京 100193)

摘要:噻虫嗪是当前全球使用范围最广、销量最大的新烟碱类杀虫剂之一。随着噻虫嗪在农业生产中的广泛应用,其在土壤环境中的归趋行为及其对环境非靶标生物的毒性效应已成为研究热点。本文对噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在农田土壤中的降解、吸附等环境行为及主要影响因素进行了总结,并概述了噻虫嗪及其代谢物噻虫胺对不同环境非靶标生物的影响。与此同时,基于目前针对噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在农田土壤中的环境行为及其对非靶标生物毒性效应的相关研究存在的不足,提出了未来研究应该关注的重点和方向。本文对噻虫嗪及其代谢物噻虫胺的科学合理使用具有一定的指导意义,并为缓解噻虫嗪或其他新烟碱类杀虫剂对土壤的污染以及降低该类杀虫剂对非靶标生物的环境风险提供理论依据。

关键词:噻虫嗪;噻虫胺;环境归趋;生态毒性;环境风险

中图分类号:TQ 453;X 53 **文献标志码**:A doi:10.3969/j.issn.1671-5284.2022.03.004

Research Progress on Environmental Fate of Thiamethoxam and its Metabolites Clothianidin in Soil and Toxic Effects on Non-target Organisms

PAN Lixuan[1,2], MAO Liangang[2*], ZHANG Lan[2], ZHANG Yanning[2], ZHU Lizhen[2], JIANG Hongyun[2], ZHANG Qingming[1], LIU Xingang[2*]

(1. College of Plant Health and Medicine, Qingdao Agricultural University, Shandong Qingdao 266109, China; 2. Institute of Plant Protection, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100193, China)

Abstract: Thiamethoxam is one of the most widely used and best-selling neonicotinoid insecticides in the world. The environmental fate and toxic effects on non-target organisms have been a research hotspot with the widespread use of thiamethoxam in agricultural production. This paper mainly summarized the environmental behaviors (degradation and adsorption), and the main impact factors of thiamethoxam and its metabolites clothianidin in farmland soil. The ecotoxicological effects of thiamethoxam and its metabolites clothianidin on environmental non-target organisms were also briefly elaborated. Meanwhile, the focus and direction of future research were put forward in view of the deficiencies of the current research on the environmental behaviors of thiamethoxam and its metabolites clothianidin in farmland soil and toxic effects on environmental non-target organisms. This study had certain significance for guiding scientific and rational use of thiamethoxam and its metabolite thiamethoxam, providing theoretical basis for alleviating soil pollution generated by thiamethoxam or other neonicotinoid insecticides and reducing their environmental risks to non-target organisms.

Key words: thiamethoxam; clothianidin; environmental fate; ecotoxicology; environmental risk

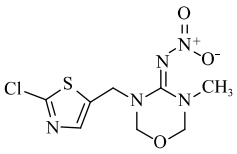
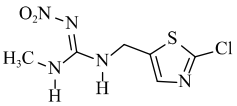
收稿日期:2021-11-19
基金项目:国家自然科学基金(31801769)
作者简介:潘莉璇(1998—),女,山东烟台人,硕士研究生,研究方向为农药环境影响及污染修复。E-mail:panlixuan20@163.com
通信作者:毛连纲(1987—),男,山东潍坊人,博士,副研究员,主要从事农药生态毒理与环境风险评估。E-mail:lgmao@ippcaas.cn
共同通信作者:刘新刚(1978—),男,山东潍坊人,博士,研究员,主要从事农药环境影响与污染防控等研究。E-mail:liuxingang@caas.cn

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

新烟碱类农药是目前世界上使用最广泛的杀虫剂种类之一[1]。该类杀虫剂对昆虫中枢神经系统的烟碱型乙酰胆碱受体具有高度亲和性，促使昆虫神经元亢奋，从而造成昆虫在短时间内死亡[2]。新烟碱类杀虫剂具有高效、广谱的杀虫活性，其发展速度快、应用范围广、在全球市场上占有率高，且与传统的杀虫剂无交互抗性，可通过内吸、触杀和胃毒等多重作用防治害虫，通常以茎叶喷雾、土壤处理和种子包衣等多种方式被应用于生产实践。

噻虫嗪和噻虫胺均为第二代新烟碱类杀虫剂。其中，噻虫嗪由瑞士诺华公司研发并上市，而噻虫胺由德国拜耳公司和日本武田公司开发并上市[3]。噻虫嗪具有杀虫活性高、杀虫谱广及与环境相容性好等特点，可以取代高毒性且残留期长的有机磷、有机氯和氨基甲酸酯类杀虫剂。噻虫胺是噻虫嗪的主要代谢物，具有与噻虫嗪相似的杀虫活性，两者均可用于水稻和果蔬上飞虱和蚜虫等害虫的防治[4]。噻虫嗪和噻虫胺的理化性质[5-6]详见表1。

表 1　噻虫嗪和噻虫胺的理化性质

基本信息	噻虫嗪	噻虫胺
CAS号	153719-23-4	210880-92-5
分子式	$C_8H_{10}ClN_5O_3S$	$C_6H_8ClN_5O_2S$
结构式		
分子量	291.7	249.7
水中溶解度/(g·L^{-1})	4.1（25℃）	0.327（20℃）
密度/(g·cm^{-3})（20℃）	1.57	1.61
熔点/℃	139.1	176.8
饱和蒸汽压/Pa（25℃）	6.6×10^{-9}	1.3×10^{-10}

根据中国农药信息网（http://www.icama.org.cn/），本文对噻虫嗪和噻虫胺单剂及其混剂的登记情况进行了查询（截至日期：2021年10月13日），详见表2。

表 2　噻虫嗪和噻虫胺的登记情况

药剂	单剂（含原药）/种	混剂/种	合计/种
噻虫嗪	376	96	472
噻虫胺	102	14	116

农药被施用至农田中后，土壤会承载大部分的残余农药，这对土壤环境造成严重威胁。由于新烟碱类农药具有相对较长的土壤降解半衰期，在土壤环境中大量频繁地应用此类农药，可能会导致该类农药在土壤中累积。新烟碱类农药通过吸附、解吸和降解等环境归趋在土壤中不断积累，将会增加对蚯蚓等土壤非靶标生物的环境暴露风险[7]，从而导致非靶标环境生物的繁殖力下降甚至死亡，破坏水生生态系统的完整性和降低地下水的安全性等环境问题[8]。本文将通过综述噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在农田土壤中的降解、吸附环境行为及主要影响因素，并概述两者对不同环境非靶标生物的影响，从而为这2种新烟碱类农药的科学合理应用和规避环境风险提供一定的指导。

1　噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在土壤中的环境行为

1.1　噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在土壤中的降解

1.1.1　土壤降解半衰期

土壤生态系统是自然生态环境的重要组成部分[9]，农药被施用于农作物后，其中的大部分会进入土壤环境[10]。噻虫嗪和噻虫胺在不同条件、不同地域土壤中的半衰期存在较大差异，但目前尚无统一的数据，初步推测可能与农药的施用量以及土壤环境条件的差异等因素有关。

噻虫嗪的土壤降解半衰期。噻虫嗪在实验室条件下的土壤降解半衰期为34～353 d，在田间土壤中的半衰期为7～109 d[11]。Hilton等[12]通过在欧洲多地的田间试验并转换为20℃标准条件后得到噻虫嗪的田间土壤半衰期为7.1～92.3 d。噻虫嗪被应用于我国不同作物上后，其在农田土壤中的半衰期为3.7～22.4 d[13-20]（表3）。

噻虫胺的土壤降解半衰期。噻虫胺是噻虫嗪在土壤中的主要代谢物。与噻虫嗪相比，其在土壤中的半

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

衰期更长。噻虫胺在实验室条件下的土壤降解半衰期为143～1 001 d，在田间土壤中的半衰期为277～1 386 d[11, 21]。噻虫胺被应用于我国不同作物上后，其在农田土壤中的半衰期为5.92～90.0 d[22-26]（表4）。

表 3　噻虫嗪在我国农田土壤中的残留量及半衰期

作物品种	残留量/(μg·kg⁻¹)	半衰期/d	参考文献
苹果	293～2 440	6.36	[13]
小麦	50～138	3.7～5.3	[14]
大葱	19～233	4.4～14.9	[15]
韭菜	174～3 400	8.8～11.4	[16]
酿酒葡萄	3～82.24	10.0	[17]
甘蔗	146～153	17.3～22.4	[18]
	12～332	16.91	[19]
柑橘	26～1 384	3.9～4.2	[20]

表 4　噻虫胺在我国农田土壤中的残留量及半衰期

作物品种	残留量/(μg·kg⁻¹)	半衰期/d	参考文献
甘蔗	121～709	11.2～90.0	[22]
	364～1 642	24.3～26.4	[23]
韭菜	27～2 534	5.92～7.70	[24]
水稻	＜70	6.5～27.7	[25]
番茄	40～2 060	9.4～21	[26]

1.1.2　土壤降解方式

噻虫嗪和噻虫胺在土壤环境中的降解方式包括光解、水解和微生物降解等。其中，微生物降解是其在土壤中降解的主要方式[11]。

光解。Li等[21]通过比较不同波长光照对噻虫嗪和噻虫胺在土壤环境中光降解的影响后发现，中波紫外线B（UVB）在其光降解过程中起到关键作用，而可见光和长波紫外线A（UVA）的影响不显著。于自然光照条件下，噻虫嗪和噻虫胺在不同土壤中的降解半衰期分别为88～103 h和97～112 h，而在没有土壤的自然光照条件下，噻虫嗪和噻虫胺的光降解会明显加快，半衰期仅为10和13 h[21]。此外，噻虫嗪有3种光降解产物，噻虫胺有4种光降解产物。其中，噻虫胺是噻虫嗪的光降解产物之一。相比在土壤中直接施用，在地上部喷施噻虫嗪和噻虫胺，两者在到达土壤表面后更容易被光解。同时，由于光解只发生在距离土壤表面1～5 mm深处，因此噻虫嗪和噻虫胺在土壤中的光解行为通常可忽略不计[9]。

水解。温度、pH、金属离子和氧化物等因素均会影响噻虫嗪和噻虫胺的水解[27]。温度越高，噻虫嗪和噻虫胺的水解速率越大。噻虫嗪和噻虫胺的水解机理均为碱性水解（图1），即水解速率随pH值的升高而加快[7, 27]。噻虫嗪和噻虫胺在中性及酸性条件下难以水解，如土壤中腐殖酸自身的酸性会抑制其水解，还可以通过氢键等作用将其吸附而减弱水解能力[27]。Cu^{2+}通过在水中形成活性更强的亲核试剂金属羟基络合物而催化其水解；$Fe(OH)_3$中的Fe可以与C=N基团中N上的孤对电子配合，使其更易受到OH^-的进攻而发生水解。

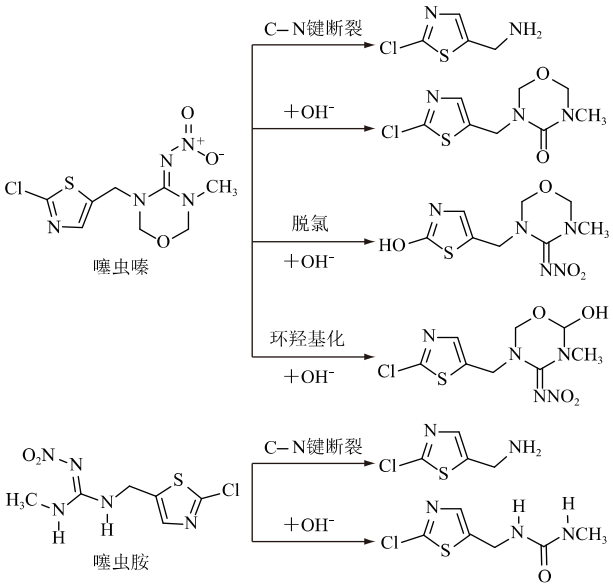


图 1　噻虫嗪和噻虫胺的水解机理

微生物降解。菌属、土壤温度、湿度、pH、有机物含量以及土壤水中的有机碳浓度等多个因素均会影响噻虫嗪和噻虫胺的微生物降解，从而影响其在土壤中的迁移转化[28]。目前发现的有效降解噻虫嗪和噻虫胺的土壤微生物为变形菌门和放线菌门，利用其作为碳源和氮源，通过硝化还原等途径可实现微生物降解[29]。例如，根瘤菌*Ensifer adhaerens* TMX-23可以通过硝化还原途径将噻虫嗪转化为亚硝基、亚氨基和尿素[30]。温度、湿度等环境因素通过影响土壤微生物的活性，进而影响土壤中酶的活性，最终间接影响到微生物对噻虫嗪和噻虫胺的降解[28]，但目前关于噻虫嗪和噻虫胺微生物降解途径的相关研究较少[31]。

1.2　噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在土壤中的吸附

噻虫嗪和噻虫胺在农田中通过茎叶喷雾、种子包衣以及土壤处理后，仅有少部分的有效成分可以被作物吸收，大部分的有效成分会分散到更广泛的环境介质中。土壤吸附能够反映农药在土壤中的移动性。土壤对农药吸附能力越强，农药的移动扩散能力越弱，农药危害环境的影响越小。

除了农药自身的结构和性质，土壤的质地、有机质含量、pH、温度、含水量等均会影响土壤对农药

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

的吸附。张鹏等[32]通过振荡平衡法等比较了噻虫嗪在不同类型土壤中的吸附性，结果发现黏粒含量是影响土壤吸附药剂的最关键因素，而土壤有机质含量的影响次之。吴俊学[31]通过温室土柱试验模拟田间环境，发现种衣剂噻虫嗪在有机质含量较低且持水量较高的粘土柱中吸附性差，迁移能力强，降解速度快；在有玉米植株的环境体系中，噻虫嗪在土壤中的吸附性会增强，迁移能力减弱，降解速度下降。吴文铸等[33]通过室内模拟试验，研究了噻虫胺在不同土壤中的吸附特性，结果发现土壤有机质含量是影响土壤吸附的主要因素，其次因素是土壤质地。

2　噻虫嗪及其代谢物噻虫胺对土壤非靶标生物的影响

2.1　噻虫嗪及其代谢物噻虫胺对蚯蚓的影响

蚯蚓是土壤中常见的无脊椎动物，研究人员可以通过蚯蚓的生态毒理试验来诊断土壤的污染状况[34]。王彦华等[35]通过人工土壤法试验发现，噻虫嗪对赤子爱胜蚯蚓（*Eisenia fetida*）的急性毒性很低，在7和14 d的半致死浓度（LC_{50}）均大于1 200 mg/kg。查询欧洲化学品管理局（ECHA）环境毒性数据库（https://echa.europa.eu/），发现噻虫嗪对赤子爱胜蚯蚓的急性毒性同样很低，14 d的LC_{50}值大于1 000 mg/kg；对赤子爱胜蚯蚓的慢性毒性（56 d）最大无作用浓度（NOEC）为0.68 mg a.i./kg；对蚯蚓田间试验（337 d）无可观测生态不良效应用量（NOEAER）为0.133 mg a.i./kg。查询ECHA环境毒性数据库，发现噻虫胺对赤子爱胜蚯蚓的急性毒性很高，14 d的LC_{50}值为13.21 mg/kg；对赤子爱胜蚯蚓的慢性毒性（56 d）NOEC值为0.2 mg a.i./kg；对蚯蚓田间试验（365 d）NOEAER值为0.15 mg a.i./kg。综上所述，噻虫胺对蚯蚓的急性毒性要明显高于母体噻虫嗪，而噻虫嗪对蚯蚓的慢性毒性和田间试验毒性与噻虫胺差异不大，仅略低于噻虫胺，这可能与噻虫嗪在土壤中会代谢为噻虫胺有关[36]。

2.2　噻虫嗪及其代谢物噻虫胺对其他土壤生物的影响

噻虫嗪可以通过直接接触影响日本弓背蚁（*Camponotus japonicus*）的招募与亲系识别行为，影响蚂蚁社会种群的稳定与发展[37]。在果园施用噻虫嗪，其在5 d内会显著抑制土壤蜘蛛类和甲虫的种群数量，导致生物多样性指数降低[13]，但在长期暴露试验（28 d）中未发现噻虫嗪和噻虫胺对土壤中甲螨存在负面影响[36]。此外，查询ECHA环境毒性数据库，发现噻虫胺对土壤中白符跳虫（*Folsomia candida*）的慢性毒性（28 d）NOEC值为0.32 mg a.i./kg。

3　讨论与展望

噻虫嗪和噻虫胺药剂的大量使用，将会影响到环境非靶标生物的安全。如何科学使用合适的农药剂型与施用方式已成为规避和降低其环境风险的重要策略。为了规避和降低新烟碱类农药对蜜蜂的风险，相比常规叶面喷雾，会优先选择土壤灌根或播种期缓释颗粒撒施，通过提前施药来避开花期用药，从而降低其对蜜蜂的潜在风险。然而，噻虫嗪和噻虫胺的土壤施药方式在降低了其对蜜蜂的环境风险的同时，可能会增加对蚯蚓等土壤非靶标生物的环境风险，因此如何更好地规避和平衡环境风险，从而延长农药老产品的使用寿命已成为目前农药应用中的难题。

不同的土壤类型和作物种类等均会影响噻虫嗪和噻虫胺在土壤中的半衰期，而目前关于噻虫嗪和噻虫胺在土壤中的降解途径和速率的研究较少，也缺少对其毒性作用机理、生态风险评价、生物富集以及微生物降解的深入研究。此外，我们还需要重视噻虫嗪与其他农药对环境生物的联合毒性作用，即复合污染问题[38]。下一步，需要深入开展噻虫嗪及其代谢物噻虫胺对蚯蚓等土壤非靶标生物的作用机理研究，并优化暴露模型参数，更加科学地评估噻虫嗪及其代谢物噻虫胺对非靶标生物构成的潜在危害及生态风险。

参考文献

[1] 巩文雯, 刘庆菊, 胡彬, 等. 农产品中新烟碱类杀虫剂噻虫嗪残留分析研究进展[J]. 广东农业科学, 2017, 44(12): 103-109.

[2] SIMON-DELSO N, AMARAL-ROGERS V, BELZUNCES L P, et al. Systemic insecticides (neonicotinoids and fipronil): trends, uses, mode of action and metabolites[J]. Environmental Science and Pollution Research International, 2015, 22(1): 5-34.

[3] 毛连纲, 徐冬梅, 袁善奎, 等. 基于推荐用量分析我国新烟碱类杀虫剂的登记现状[J]. 植物保护, 2020, 46(5): 200-210.

[4] 孙东磊, 赵欢欢, 安玉兴, 等. 3种新烟碱类杀虫剂对甘蔗螟虫的活性及防治效果[J]. 广东农业科学, 2017, 44(6): 109-113.

[5] 董玉轩, 梁艳辉. 新烟碱类杀虫剂专利技术综述[J]. 农药科学与管理, 2015, 36(7): 13-16.

[6] EPA. EFED (Environmental Fate and Effects Division) registration chapter for clothianidin for use on potatoes and grapes as a spray treatment and as a seed treatment for sorghum and cotton[EB/OL].

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

(2005-09-28) [2022-01-27]. https://www3.epa.gov/pesticides/chem_search/cleared_reviews/csr_PC-044309_28-Sep-05_a.pdf.

[7] 程浩淼, 成凌, 朱腾义, 等. 新烟碱类农药在土壤中环境行为的研究进展[J]. 中国环境科学, 2020, 40(2): 736-747.

[8] CHAGNON M, KREUTZWEISER D, MITCHELL E A D, et al. Risks of large-scale use of systemic insecticides to ecosystem functioning and services[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2015, 22(1): 119-134.

[9] 吴绍华, 虞燕娜, 朱江, 等. 土壤生态系统服务的概念、量化及其对城市化的响应[J]. 土壤学报, 2015, 52(5): 970-978.

[10] 马畅, 刘新刚, 吴小虎, 等. 农田土壤中的农药残留对农产品安全的影响研究进展[J]. 植物保护, 2020, 46(2): 6-11.

[11] GOULSON D. REVIEW: an overview of the environmental risks posed by neonicotinoid insecticides[J]. Journal of Applied Ecology, 2013, 50(4): 977-987.

[12] HILTON M J, JARVIS T D, RICKETTS D C. The degradation rate of thiamethoxamin European field studies[J]. Pest Management Science, 2015, 72(2): 388-397.

[13] 孙艳超, 寇弘儒, 夏孟婧, 等. 苹果园噻虫嗪表土残留及其对地表节肢动物的影响[J]. 环境昆虫学报, 2021, 10(27): 1-12.

[14] 陈国峰, 李雪茹, 刘峰, 等. 高效氯氟氰菊酯、噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在小麦中的残留及消解动态分析[J]. 麦类作物学报, 2018, 38(1): 119-125.

[15]王博, 侯志广, 方楠, 等. 噻虫嗪及其代谢物在大葱中的消解动态及最终残留[J]. 农药, 2018, 57(9): 671-674.

[16] 冯义志, 潘金菊, 齐晓雪, 等. 噻虫嗪及其代谢物噻虫胺在韭菜和土壤中的残留消解动态及残留量[J]. 现代农药, 2016, 15(5): 45-48.

[17] 张怡, 赵亚楠, 姜彩鸽, 等. 噻虫嗪在酿酒葡萄果实和土壤中的残留动态和风险评估[J]. 现代农药, 2015, 14(6): 35-37.

[18] 郇志博, 罗金辉, 谢德芳. 噻虫嗪在甘蔗和土壤中的残留行为及风险评估[J]. 南方农业学报, 2018, 49(11): 2282-2291.

[19] RAMASUBRAMANIAN T, PARAMASIVAM M. Dissipation kinetics and environmental risk assessment of thiamethoxam in the sandy clay loam soil of tropical sugarcane crop ecosystem[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2020, 105(3): 474-480.

[20] GUI T, JIA G F, XU J, et al. Determination of the residue dynamics and dietary risk of thiamethoxam and its metabolite clothianidin in citrus and soil by LC-MS/MS[J]. Journal of Environmental Science and Health, Part B, 2019, 54(4): 326-335.

[21] LI Y, LI Y D, LIU Y M, et al. Photodegradation of clothianidin and thiamethoxam in agricultural soils[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, 25: 31318-31325.

[22] 彭思雅, 叶昊, 韦婕, 等. 噻虫胺、噻虫嗪、毒死蜱、杀虫单在土壤和甘蔗中的残留消解动态[J]. 农药, 2020, 59(11): 814-820.

[23] 管欢, 黄慧俐, 行艳景, 等. 噻虫胺在甘蔗和土壤中的残留分析及消解动态[J]. 现代农药, 2015, 14(2): 42-45.

[24] 王勇庆. 噻虫胺、氟铃脲在韭菜上的残留及噻虫胺在韭菜中的时空分布[D]. 广州: 华南农业大学, 2018.

[25] 杨庆喜, 刘娜, 程功, 等. 噻虫胺在水稻和土壤中的残留及消解动态[J]. 农药, 2018, 57(5): 343-346; 358.

[26] 张鹏, 金芬, 杨莉莉, 等. 噻虫胺在番茄和土壤中的残留及消解动态[J]. 农药学学报, 2016, 18(4): 490-496.

[27] 郑立庆, 刘国光, 孙德智. 新型农药噻虫嗪的水解与光解研究[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(6): 1005-1008.

[28] 刘娟, 张乃明. 噻虫嗪在农田土壤中环境行为的研究进展[J]. 土壤, 2020, 52(5): 883-890.

[29] CHEN J H, LIU X Y, ZHENG J W, et al. Biochar soil amendment increased bacterial but decreased fungal gene abundance with shifts in community structure in a slightly acid rice paddy from Southwest China[J]. Applied Soil Ecology, 2013(71): 33-44.

[30] ZHOU G C, WANG Y, ZHAI S, et al. Biodegradation of the neonicotinoid insecticide thiamethoxam by the nitrogenfixing and plant-growth-promoting rhizobacterium *Ensifer adhaerens* strain TMX-23[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2013, 97(9): 4065-4074.

[31] 吴俊学. 噻虫嗪及噻唑硫磷在环境中的消解、运移及去除行为探究[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.

[32] 张鹏, 慕卫, 刘峰, 等. 噻虫嗪在土壤中的吸附和淋溶特性[J]. 环境化学, 2015, 34(4): 705-711.

[33] 吴文铸, 郭敏, 孔德洋, 等. 噻虫胺在土壤中的吸附和淋溶特性[J]. 环境化学, 2012, 31(11): 1730-1735.

[34] CHEN X, WANG X R, GU X X, et al. Oxidative stress responses and insights into the sensitivity of the earthworms *Metaphire guillelmi* and *Eisenia fetida* to soil cadmium[J]. Science of the Total Environment, 2017, 574(1): 300-306.

[35] 王彦华, 陈丽萍, 赵学平, 等. 新烟碱类和阿维菌素类药剂对蚯蚓的急性毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12): 2299-2304.

[36] EITCHIE E E, MAISONNEUVE F, SCROGGINS R P, et al. Lethal and sublethal toxicity of thiamethoxam and clothianidin commercial formulations to soil invertebrates in a natural soil[J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2019, 38(5): 2111-2120.

[37] 张松, 鲍海波, 张建华, 等. 亚致死剂量噻虫嗪对日本弓背蚁觅食和亲系识别能力的影响[J]. 南京农业大学学报, 2019, 42(2): 270-275.

[38] 李田田, 郑珊珊, 王晶, 等. 新烟碱类农药的污染现状及转化行为研究进展[J]. 生态毒理学报, 2018, 13(4): 9-21.

（责任编辑：高蕾）

(C)1994-2022 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net